

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <https://ejournal.brin.go.id/urania/>



PERILAKU KOROSI BAJA KARBON RENDAH PIPA PENDINGIN SEKUNDER REAKTOR DALAM INHIBITOR ZINK FOSFAT

Rosika Kriswarini¹, Mohammad Khotib², Andon Insani³, Komar Sutriah²,
Noviarty¹, Arif Nugroho¹, Enung Nurlia¹

¹Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN
Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Gd. 720, Tangerang Selatan, Banten 15314

²Departemen Kimia, Fakultas MIPA IPB
Jl. Raya Dramaga, Bogor, Jawa Barat 16680

³Pusat Riset Teknologi Analisis Berkas Nuklir – BRIN
Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: rosi004@brin.go.id

(Naskah diterima: 30–01–2024, Naskah direvisi: 21–03–2024, Naskah disetujui: 20–04–2024)

ABSTRAK

PERILAKU KOROSI BAJA KARBON RENDAH PIPA PENDINGIN SEKUNDER REAKTOR DALAM INHIBITOR ZINK FOSFAT. Baja karbon, dalam industri nuklir, salah satunya digunakan sebagai bahan struktur pipa pendingin sistem pengoperasian reaktor nuklir. Dalam pemakaiannya, pipa tersebut rentan terhadap korosi karena kontak dengan air pendingin. Inhibitor larutan zink fosfat yang berasal dari campuran zink klorida dan asam fosfat dengan variasi konsentrasi 25, 35, 50, 75 dan 100 ppm dalam NaCl 0,1% digunakan sebagai bahan untuk mempelajari pengaruh laju korosi baja karbon. Metode elektrokimia sangat membantu untuk mengamati perilaku korosi baja karbon dalam media zink fosfat. Metode yang dilakukan meliputi *Open Circuit Potensial (OCP)* selama 600 detik, *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)* pada rentang frekuensi 10^5 Hz sampai dengan 0,01 Hz dan *Potensiodynamic Plot (PDP)* pada rentang tegangan -1 Volt sampai dengan 1 Volt menggunakan potensiostat. Untuk menunjang hasil uji korosi, dilakukan pengamatan morfologi menggunakan SEM, komposisi kimia menggunakan XRF dan C/S Analyzer dan kandungan larutan zink fosfat menggunakan AAS, UV-Vis dan FTIR. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pada konsentrasi 35 ppm, laju korosi memberikan nilai yang lebih rendah dibanding pada konsentrasi lain. Laju korosi tersebut sebesar 11,7 mpy.

Kata kunci: korosi, baja karbon, inhibitor.

ABSTRACT

CORROSION BEHAVIOR OF LOW CARBON STEEL SECONDARY COOLING PIPE OF REACTOR IN ZINC PHOSPHATE INHIBITOR. Carbon steel, one of the fuction in nuclear industry is used as a material for the cooling pipe structure of nuclear reactor operating systems. In use, the pipe is susceptible to corrosion due to contact with cooling water. Inhibitors of zinc phosphate solution derived from a mixture of zinc chloride and phosphoric acid with concentration variations of 25, 35, 50, 75 and 100 ppm in 0.1% NaCl are used as materials to study the effect of corrosion rates of carbon steel. Electrochemical methods are helpful for observing the corrosion behavior of carbon steel in zinc phosphate media. Methods include Open Circuit Potential (OCP) for 600 seconds, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) in the frequency range of 10^5 Hz to 0.01 Hz and Potentiodynamic Plot (PDP) in the voltage range of -1 Volt to 1 Volt using potentiostat. To support the results of corrosion tests, morphological observations were carried out using SEM, chemical composition of substrat using XRF and C/S Analyzer and zinc phosphate solution content using AAS, UV-Vis and FTIR. The results obtained show that at a concentration of 35 ppm, the corrosion rate gives a lower value than at other concentrations. The corrosion rate is 11.7 mpy.

Keywords: corrosion, carbon steel, inhibitor.

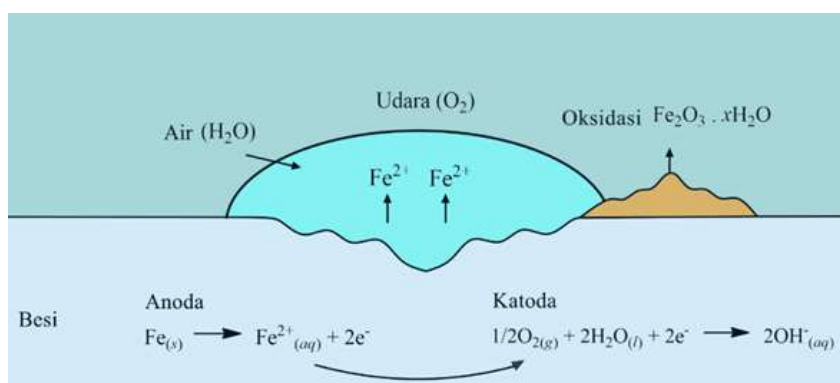
PENDAHULUAN

Baja karbon merupakan logam yang sering digunakan dalam industri migas dalam penyaluran proses eksplorasi dan produksi migas [1] dan sebagai pipa pendingin pada industri nuklir [2]. Akan tetapi baja karbon mempunyai kelemahan yaitu mudah mengalami korosi. Baja karbon digolongkan menjadi tiga kelompok berdasarkan jumlah karbon yang terkandung dalam baja, yaitu baja karbon rendah (*low carbon steel/LCS*) yang mengandung karbon < 0,25%, baja karbon menengah (*medium carbon steel/MCS*) dengan kandungan karbon sebesar 0,25-0,7%, baja karbon tinggi (*high carbon steel/HCS*) mengandung karbon 0,7-1,05% dan baja karbon sangat tinggi (*ultrahigh carbon steel/UHCS*) dengan komposisi carbon > 1,05% [3]. Baja karbon rendah (*low carbon steel*) dipilih untuk sistem pemipaan karena mempunyai keunggulan harga relatif murah, mempunyai sifat mekanik yang lembut dan ulet sehingga mudah dibentuk, kemampuan las yang baik, serbaguna untuk konstruksi. Alat-alat

rumah tangga dan otomotif tetapi mempunyai kelemahan mudah terkorosi [4]. Oleh karena itu dalam pemanfaatannya sering disesuaikan dengan kondisi lingkungan yang memperlambat terjadinya korosi.

Korosi terjadi karena interaksi material logam dengan lingkungan yang mengakibatkan degradasi sifat material [5]. Baja karbon termasuk bahan yang mudah terkorosi karena mengandung unsur besi (Fe) yang memicu terjadinya korosi. Metode pengurangan laju korosi dilakukan dengan berbagai cara antara lain *weight loss method*, *salt spray test*, *surface studies*, polarisasi elektrokimia dan EIS [1] [4].

Korosi substrat (baja karbon) terjadi mengikuti mekanisme seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Logam besi mengalami oksidasi pada kutub anode sedangkan udara yang mengandung oksigen dan air pada kutub katode mengalami reaksi reduksi. Dengan demikian besi mengalami oksidasi membentuk besi oksida dan besi hidroksida yang menimbulkan korosi dan karat.



Gambar 1 Mekanisme terjadinya korosi logam besi [6]

Penggunaan inhibitor korosi merupakan salah satu metode untuk menghambat terjadinya korosi. Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi inhibitor sebagai penghambat korosi adalah daya adsorpsi permukaan inhibitor, temperatur, konsentrasi inhibitor yang digunakan dan lingkungan sekitar [7]. Perhitungan efisiensi inhibitor (*IE*) menggunakan persamaan (1) [9]

$$EI = \frac{i_{corr} - i'_{corr}}{i_{corr}} \times 100\% \quad (1)$$

dengan

i corr = arus densitas korosi tanpa inhibitor

i' corr = arus densitas korosi dengan inhibitor

Berdasarkan karakteristik lapisan pelindung, maka inhibitor korosi dibagi menjadi tiga jenis yaitu inhibitor katode, inhibitor anode, dan inhibitor adsorpsi. Inhibitor katode dan anode merupakan inhibitor anorganik, sedangkan inhibitor organik termasuk dalam inhibitor adsorpsi [10]. Zink fosfat merupakan salah satu jenis inhibitor yang sering digunakan dalam menghambat laju korosi karena mempunyai kelebihan dengan adanya fosfat yang memiliki kemampuan untuk meningkatkan adhesi organik lapisan atas dan pencegahan korosi pada lapisan permukaan. Aplikasi utama fosfat adalah untuk meningkatkan ketahanan korosi, adhesi cat dan mempromosikan isolasi

listrik. Pelapis fosfat yang paling umum digunakan untuk korosi perlindungan didasarkan pada seng, besi, dan mangan [11].

Dalam penelitian ini akan dilakukan pengamatan perilaku korosi dengan cara pengukuran *Open Circuit Potential (OCP)*, *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)* dan *Potentiodynamik Polarization (PDP)* menggunakan inhibitor zink fosfat dalam konsentrasi yang bervariasi dalam media NaCl 0,1%.

METODOLOGI

Penyiapan sampel baja karbon meliputi proses pemotongan, *mounting* menggunakan resin, pemasangan kawat tembaga, penggerindaan, pembersihan dengan etanol, dan pengeringan. Baja karbon yang merupakan bahan pipa pendingin sekunder dipotong pada bagian dalam dengan tebal 3 mm dan dibubut berbentuk silinder dengan diameter 1,5 cm. Selanjutnya sampel dihubungkan dengan kawat tembaga sepanjang 15 cm yang berfungsi sebagai konduktor ketika dilakukan pengujian korosi. Untuk merekatkan sampel dengan kawat tembaga maka sampel dimounting menggunakan resin sehingga berbentuk bulat dengan diameter 2 cm. Sampel digerinda secara bertahap menggunakan kertas amplas grit 120, 500, 800 dan 1200. Setelah digerinda, permukaan sampel dibersihkan dengan etanol dan dikeringkan.

Karakterisasi komposisi unsur dalam substrat dilakukan menggunakan XRF yang terdiri dari analisis kualitatif untuk menentukan jenis unsur dan analisis kuantitatif untuk menentukan komposisi unsur. *Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX)* untuk analisis morfologi permukaan sebelum dan sesudah inhibisi, sedangkan karakterisasi larutan inhibitor menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)* untuk mengetahui kandungan Zn, *Ultra Violet – Visible (UV-Vis)* untuk mengetahui kandungan fosfat dan *Fourier Transform Infra Red (FTIR)* untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk.

Larutan inhibitor dengan konsentrasi 25, 35, 50, 75 dan 100 ppm disiapkan masing-masing sebanyak 200 mL dalam larutan NaCl 0,1%. Larutan blanko berupa larutan NaCl 0,1% juga disiapkan sebanyak 200 mL.

Pengujian perilaku korosi pada sampel LCS diawali dengan pengamatan *Open Circuit Potential (OCP)*. menggunakan potensistat selama 600 detik. Pengujian lanjutan berupa *Electrochemical Impedance Spectrometer (EIS)* pada sampel LCS dengan rentang frekuensi pengukuran dari 10^5 Hz sampai dengan 0,01 Hz dan pengujian potensiodinamik pada rentang tegangan -1 sampai dengan 1 Volt dan *scan rate* 5 mV/detik. Analisis morfologi dan distribusi unsur menggunakan SEM-EDS dengan perbesaran 500 – 2500 kali dilakukan pada permukaan sampel LCS tanpa dan dengan inhibitor zink fosfat.

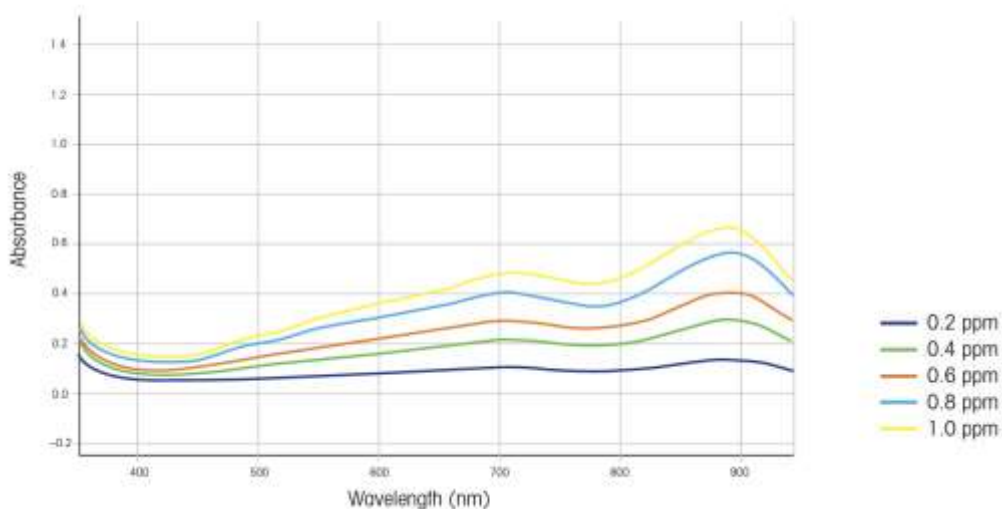
HASIL DAN PEMBAHASAN

Baja karbon rendah (LCS) yang terbentuk dari campuran besi dan karbon, mengandung karbon <0,25 %. Berdasarkan pengujian komposisi kimia menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF)* dan Carbob Sulfur Analyzer (CSA), sampel LCS yang digunakan dalam penelitian ini memiliki komposisi C sebesar 0,126%, Si 0,183%, Ti 0,051%, Mn 0,234% dan Cr 0,055%. Hal ini sesuai dengan spesifikasi LCS yang terdapat di ASTM [12].

Baja karbon dengan komposisi tsb dalam aplikasinya membutuhkan inhibitor korosi untuk meningkatkan umur pakainya. Inhibitor yang biasa digunakan berupa larutan zink fosfat. Pada penelitian ini hasil analisis larutan zink fosfat dari Delta.Chem dengan menggunakan AAS diperoleh kandungan Zn sebesar 3,7% dan dengan menggunakan UV-Vis diperoleh kandungan fosfat sebesar 8,65%. Kadar tersebut dari segi produk mendekati spesifikasi yaitu Zn berupa $ZnCl_2$ sebesar 5-10% dan fosfat dalam bentuk asam fosfat sebesar 5-10% [13]. Menurut Cosimo, puncak spektrum fosfat menggunakan UV-Vis pada panjang gelombang 880 nm. Semakin tinggi konsentrasi larutan, semakin besar nilai absorbannya [14]. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.

Selain menggunakan UV-Vis untuk menganalisis kandungan fosfat dalam inhibitor, maka untuk mengetahui gugus fungsional yang ada dalam inhibitor dilakukan pengukuran menggunakan FTIR. Hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 3.

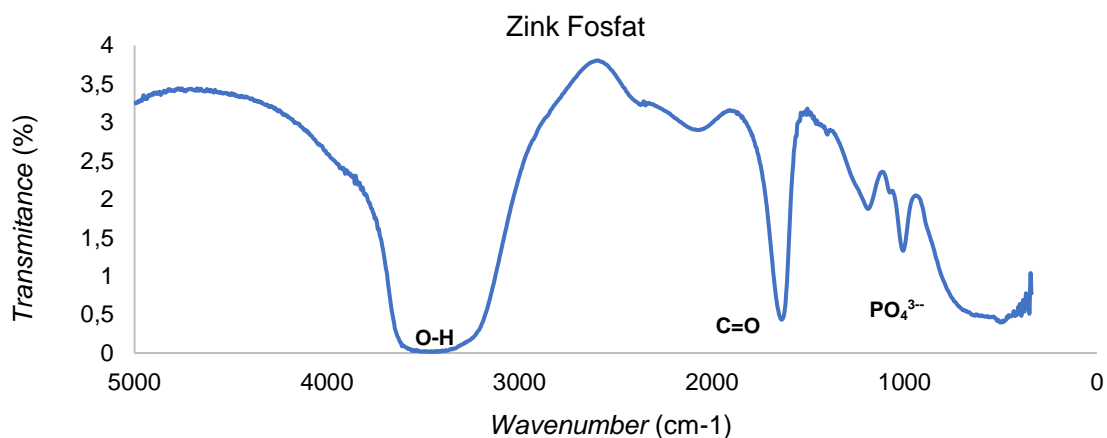
Perilaku Korosi Baja Karbon Rendah Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Dalam Inhibitor Zink Fosfat
 (Rosika Kriswarini, Mohammad Khotib, Andon Insani, Komar Sutriah,
 Noviarty, Arif Nugroho, Enung Nurlia)



Gambar 2. Spektrum absorbansi ion fosfat pada konsentrasi yang bervariasi [14]

Gambar 3 menunjukkan bahwa di dalam inhibitor zink fosfat terdapat gugus fungsional O-H (hidroksil), C=O (β diketon), and PO_4^{3-} (fosfat). Gugus OH pada bilangan gelombang 3438,95/cm termasuk daerah spektrum 4000-2500/cm. Ikatan rangkap C=O pada bilangan gelombang 1639,43/cm termasuk dalam daerah spektrum 2000-

1500/cm. Daerah spektrum 400-1500/cm sebagai daerah *finger print* teridentifikasi spektrum PO_4^{3-} pada bilangan gelombang 1191,96 dan 1008,73/cm [15]. Gambar 2 identik dengan analisis FTIR terhadap inhibitor lain (Siskem) yang telah dilakukan oleh peneliti yang lain [16].



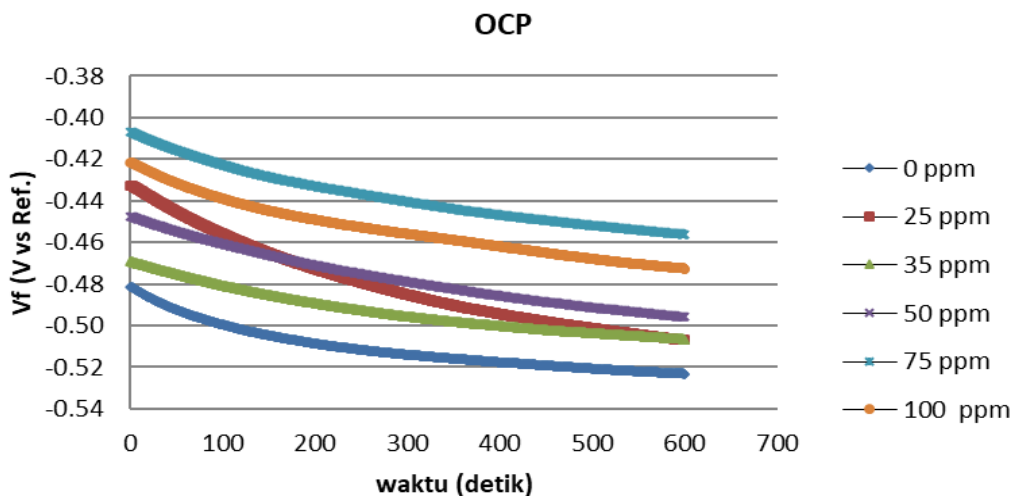
Gambar 3. Hasil pengukuran inhibitor menggunakan FTIR.

Pengujian korosi baja karbon terdiri dari pengujian *Open Circuit Potensial (OCP)*, *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)* dan *Potentiodynamic Polarization (PDP)* [4] [17].

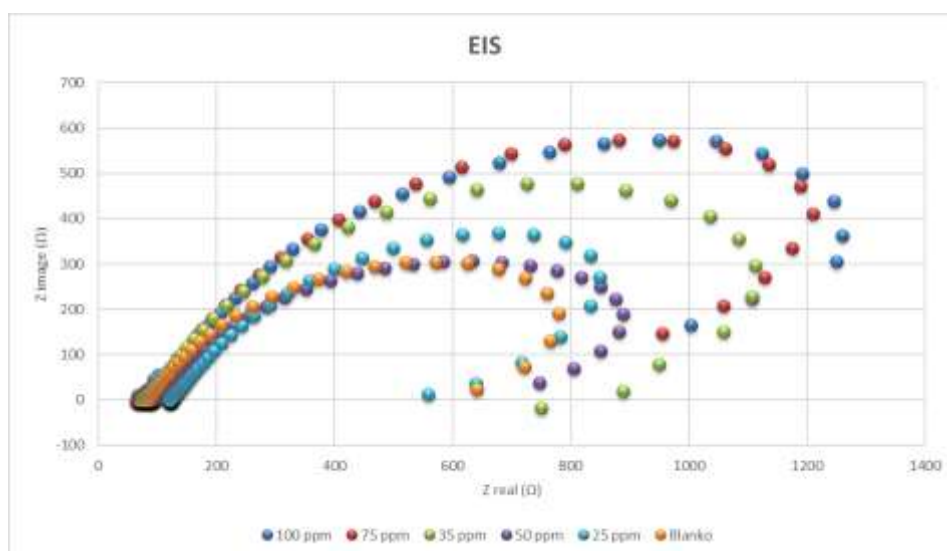
Gambar 4 menunjukkan bahwa kurva OCP untuk larutan tanpa inhibitor memberikan tegangan kerja yang lebih positif dibanding dengan tegangan kerja larutan yang menggunakan inhibitor. Hal ini menunjukkan bahwa potensial antara substrat dan larutan tergantung pada konsentrasi inhibitor.

Sedangkan untuk seluruh variasi konsentrasi, tegangan kerja telah stabil setelah perendaman larutan selama 10 menit, sehingga uji korosi selanjutnya bisa dilakukan tanpa pengaruh faktor eksternal, salah satunya tegangan kerja yang belum stabil.

Pengujian EIS dilakukan untuk mengetahui perilaku korosi sampel LCS pada konsentrasi 0, 25, 35, 50, 75 dan 100 ppm dalam larutan NaCl 0,1% ditunjukkan sebagai kurva *Niquist* pada Gambar 5.



Gambar 4. Kurva OCP LCS variasi konsentrasi inhibitor

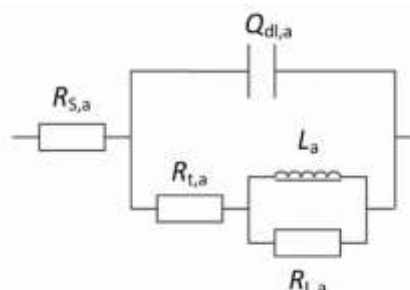


Gambar 5. Kurva Niquist LCS metode EIS variasi konsentrasi

Kurva Nyquist berupa diagram yang merupakan plot impedansi nyata/Z real (ohm/Ω) terhadap impedansi imajiner/Z image (ohm/Ω). Hasil analisis EIS berdasarkan kurva pada Gambar 5 dinyatakan sebagai rangkaian listrik seperti pada Gambar 6.

Pada umumnya penambahan inhibitor akan menaikkan tahanan transfer muatan (R_{ct}) sehingga menghambat transfer muatan atau elektron dari permukaan logam ke media larutan. Dengan demikian reaksi oksidasi atom-atom besi dan reduksi ion dalam larutan menurun. Komponen yang terdapat pada rangkaian listrik pada gambar 6 terdiri dari R_s , $R_{t,a}$ (R_{ct}), R_b ($R_{L,a}$), CPE1 ($Q_{dl,a}$), CPE2 (L_a) [19]. Nilai kuantitatif

komponen pada rangkaian listrik ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 6. Rangkaian listrik ekivalen berdasarkan fitting Niquist pada Gambar 5 [18].

Perilaku Korosi Baja Karbon Rendah Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Dalam Inhibitor Zink Fosfat (Rosika Kriswarini, Mohammad Khotib, Andon Insani, Komar Sutriah, Noviarty, Arif Nugroho, Enung Nurlia)

Tabel 1. Komponen listrik LCS variasi konsentrasi inhibitor dalam NaCl 0,1%.

Konsentrasi inhibitor (ppm)	Rs,a (Ω)	Rct (Ω)	Rb (Ω)	CPE1	CPE2
0	83,86	73,02	691,5	786,9e-3	783,5e-3
25	122,6	134,1	563,0	843,2e-3	918,0e-3
35	75,55	683,0	846,1	694,4e-3	642,5e-3
50	90,35	66,75	803,3	725,9e-3	735,3e-3
75	67,85	67,83	920,0	627,7e-3	620,3e-3
100	133,3	175,0	750,0	719,1e-3	619,3e-3

Nilai yang ditunjukkan pada Tabel 1 memberikan informasi bahwa tahanan larutan tidak mempengaruhi tahanan pelapisan karena nilainya relatif sama. Tahanan lapisan (Rct) memberikan nilai paling tinggi pada konsentrasi inhibitor 35 ppm yaitu 683 Ohm, yang menunjukkan bahwa laju korosi paling rendah dibanding konsentrasi lain sesuai dengan persamaan 2 .

$$laju\ korosi\ (mmpy) = \frac{K \times i_{corr} \times EW}{\rho} \quad (2)$$

dengan:

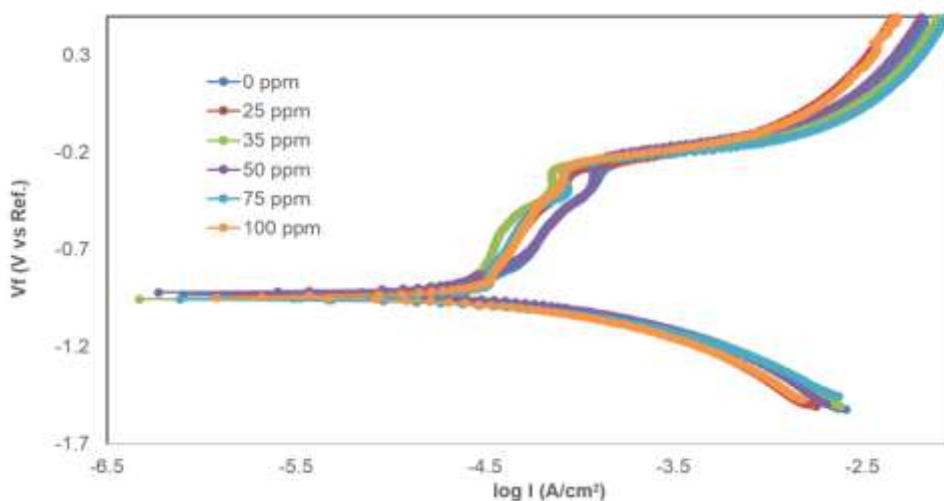
- K = konstanta = $3,27 \cdot 10^{-3}$
- i_{corr} = I_{corr} / A ($\mu A/cm^2$)
- A = luas permukaan sampel (cm^2)
- EW = *equivalent weight*
- ρ = densitas logam atau polimer (g/cm^3)
- 1 mmpy = 39,4 mpy

Laju korosi LCS dalam larutan inhibitor Zink Fosfat dan NaCl 0,1% ditentukan dengan cara pengukuran potensiodinamik. Hasil pengukuran pada Gambar 7. menunjukkan bahwa proses pelapisan

permukaan substrat oleh inhibitor tergantung pada konsentrasi inhibitor dan diinterpretasikan dengan nilai arus (i) pada sumbu-X. Pada sumbu-Y nilai V (tegangan) -1,5 V sampai dengan -1.0 V pada katoda terjadi reaksi reduksi dan pada tegangan >1.0 V sampai 5 V pada anoda terjadi reaksi oksidasi. Hasil analisis kurva potensiodinamik pada Gambar 7 diperoleh nilai arus korosi (*corr*) dan perhitungan efisiensi inhibitor sesuai dengan persamaan 1. Hal ini dinyatakan pada Tabel 2

Sesuai dengan nilai yang tercantum pada Tabel 2, efisiensi inhibitor optimal pada konsentrasi 35 ppm. Hal ini sesuai dengan nilai Rct optimal yang diperoleh dari metode EIS dan berdasarkan pustaka yang menyatakan bahwa penambahan inhibitor yang sedikit sudah bisa menghambat laju korosi yang optimal meskipun efisiensinya rendah [5] [20].

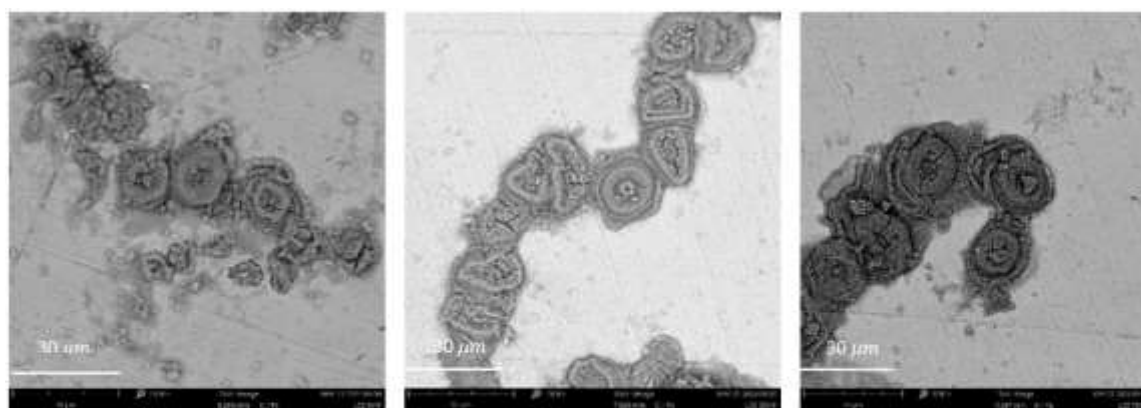
Hasil uji korosi lebih lanjut diamati menggunakan SEM untuk membandingkan morfologi permukaan sampel tanpa dan dengan inhibitor. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 7. Kurva potensiodinamik LCS variasi konsentrasi

Tabel 2 Nilai *i corr* dan efisiensi inhibitor (IE) LCS dalam NaCl 0,1%

Konsentrasi inhibitor (ppm)	<i>I corr</i> (Ampere/cm ²)	Corrosion Rate (mpy)	Efisiensi Inhibitor (%)
0	466	21,01	-
25	310	13,95	33,48
35	260	11,70	44,21
50	351	15,82	24,68
75	319	14,36	31,55
100	391	17,62	16,09



Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
26	Fe	Iron	59.27	83.55
8	O	Oxygen	40.73	16.45

(a)

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
26	Fe	Iron	65.02	86.65
8	O	Oxygen	34.98	13.35

(b)

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
26	Fe	Iron	60.79	84.40
8	O	Oxygen	39.21	15.60

(c)

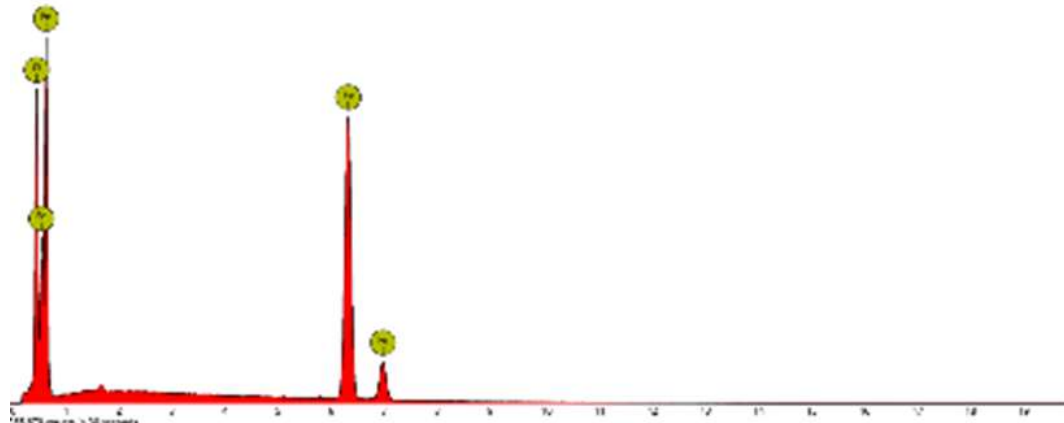
Gambar 8. Morfologi permukaan LCS setelah perlakuan korosi untuk tanpa inhibitor (a); dengan inhibitor 35 ppm (b); dan inhibitor 75 ppm (c) dengan perbesaran 500x.

Gambar 8 memperlihatkan morfologi permukaan sampel hasil uji korosi tanpa inhibitor (a) pada bagian substrat lebih gelap dibanding hasil uji korosi dengan inhibitor (b) dan (c). Hal ini didukung oleh data EDS yang menunjukkan komposisi unsur Fe dan O pada permukaan sampel. Konsentrasi O sebesar 13,35% pada konsentrasi inhibitor 35 ppm lebih rendah dibanding 75 ppm sebesar 15,6%, sementara itu konsentrasi Fe pada sampel tanpa inhibitor (a) paling rendah sebesar 83,55% dibanding yang menggunakan inhibitor (b) sebesar 86,65% dan (c) sebesar 84,4%. Dengan demikian ion besi pada (b) paling kecil kemungkinan mengalami oksidasi. Spektrum hasil pengukuran EDS untuk sampel (a), (b), (c) dengan pola yang sama ditunjukkan pada

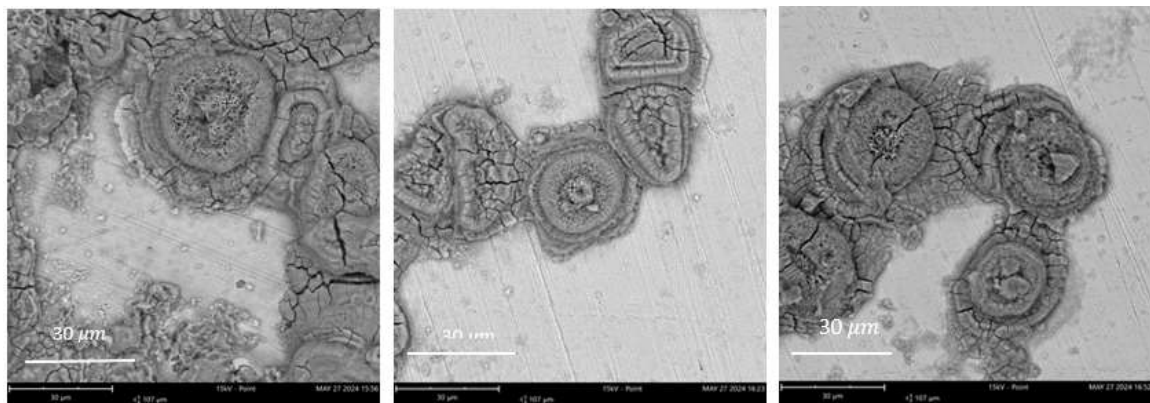
Gambar 9. Komposisi kimia permukaan sampel hasil uji korosi terdiri dari unsur Fe dan O. Hal ini sesuai dengan peristiwa terkorosinya unsur Fe tanpa dan dengan inhibitor dalam media NaCl 0,1%, dimana pada posisi permukaan yang terkorosi.

Gambar 10 dapat dilihat secara detail pada posisi permukaan yang terkorosi, dimana pada kondisi (a) konsentrasi Fe paling besar dibandingkan kondisi (b) dan (c). Dengan demikian potensi korosi tanpa inhibitor lebih berpotensi dibandingkan menggunakan inhibitor. Hasil pengukuran EDS untuk ketiga kondisi menunjukkan pola yang sama seperti pada Gambar 11. Hasil analisis EDS tersebut menunjukkan bahwa kandungan Fe relatif lebih besar dibanding O.

Perilaku Korosi Baja Karbon Rendah Pipa Pendingin Sekunder Reaktor Dalam Inhibitor Zink Fosfat
 (Rosika Kriswarini, Mohammad Khotib, Andon Insani, Komar Sutriah,
 Noviarty, Arif Nugroho, Enung Nurlia)



Gambar 9. Komposisi unsur dalam sampel hasil uji korosi



Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	59.89	29.96
26	Fe	Iron	40.11	70.04

(a)

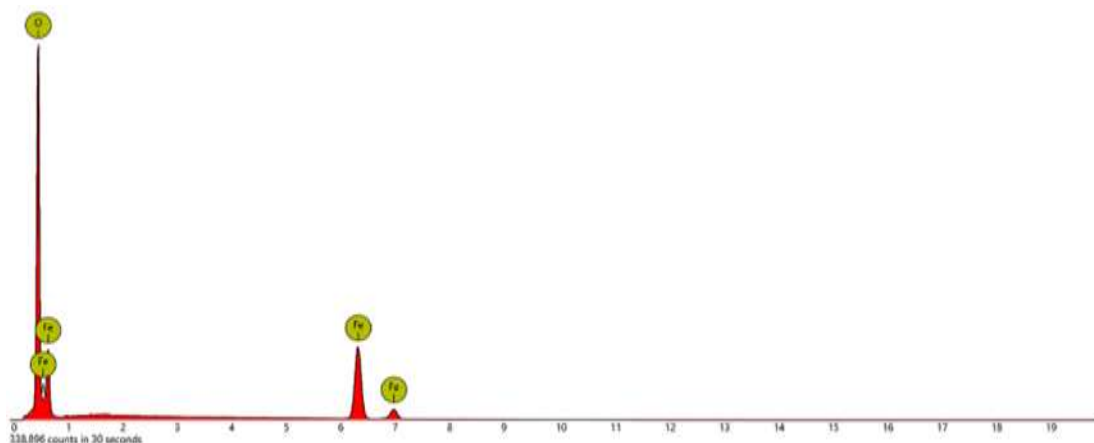
Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	68.76	38.68
26	Fe	Iron	31.24	61.32

(b)

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	72.80	43.40
26	Fe	Iron	27.20	56.60

(c)

Gambar 10. Morfologi permukaan LCS setelah perlakuan korosi tanpa inhibitor (a); dengan inhibitor 35 ppm (b); dan dengan inhibitor 35 ppm (c) 75 ppm pada perbesaran 2500x.



Gambar 11. Komposisi unsur pada posisi permukaan terkorosi

KESIMPULAN

Penambahan konsentrasi inhibitor zink fosfat meningkatkan ketahanan korosi baja karbon rendah pada konsentrasi 25 ppm sampai dengan 100 ppm. Konsentrasi optimal inhibitor pada 35 ppm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada bapak Dr. Maman Kartaman Ajiriyanto atas diskusi tentang *basic science* dan *research novelty*, Bapak Septian yang telah membantu dalam preparasi sampel uji, Bapak Abdul Aziz serta Bapak Setio Budi Utomo yang telah berkenan memberikan sampel LCS dan larutan inhibitor sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. I. H. Salleh and A. Abdullah, "Corrosion inhibition of carbon steel using palm oil leaves extract," *Indones. J. Chem.*, vol. 19, no. 3, p. 747, May 2019, doi: 10.22146/ijc.39707.
- [2] S. Sriyono *et al.*, "The debris particles analysis of RSG-GAS coolant to anticipate sediment induced corrosion," *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, vol. 18, no. 1, p. 11, Oct. 2016 doi: 10.17146/jpen.2016.18.1.2675.
- [3] D. Dwivedi *et al.*, "Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods," *RSC Advances*, vol. 7, p. 4581, 2017, doi: 10.1039/c6ra25094g.
- [4] L. Chen, D. Lu, and Y. Zhang, "Organic Compounds as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in HCl Solution: A Comprehensive Review," *Materials*, vol. 15, no. 6, p. 2023, 2022, doi: 10.3390/ma15062023.
- [5] P. D. Desai, *et al.*, "Corrosion inhibitors for carbon steel: A review," *Vietnam Journal of Chemistry*, vol. 61, no. 1, pp. 15–42, Feb. 2023, doi: 10.1002/vjch.202200111.
- [6] Anonim, "Korosi: Pengertian, Proses, Faktor Penyebab, dan Cara Pencegahan Korosi," *GLOSARIA.COM*, Des 2021.
- [7] S. Sharma *et al.*, "Recent Advances in Metallic Corrosion Inhibition: A Review," *Journal of Molecular Liquids*, pp. 3–9, 2020. doi: 10.1016/j.molliq.2020.114862.
- [8] D. Yin *et al.*, "Theoretical and electrochemical analysis on inhibition effects of benzotriazole derivatives (un- and methyl) on copper surface," *Journal of Molecular Structure*, p. 2, 2021. doi: 10.1016/j.molstruc.2021.130871.
- [9] X.-F. Wang *et al.*, "Enhanced corrosion resistance of carbon steel in hydrochloric acid solution by polyoxometalate-esterin derivatives," *ACS Omega*, vol. 7, no. 5, pp. 4429–4443, 2022. doi: 10.1021/acsomega.1c06276.
- [10] K. Tamalmani and H. Husin, "Review on Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Corrosion Issues," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 10, p. 3389, May 2020. doi: 10.3390/app10103389.
- [11] A. Vahid *et al.*, "The effect of immersion time and immersion temperature on the corrosion behavior of zinc phosphate conversion coatings on carbon steel," 2015.
- [12] ASTM A6, "Standard specification for general requirements for rolled structural steel bars, plates, shapes, and sheet Piling1." 2023.
- [13] Anonim, "MSDS Delta.Chem." PT Navto Deltachem Indonesia, 2020.
- [14] C. Caro and C. Haller, *UV/VIS Spectrophotometry - Fundamentals and Applications*. Mettler Toledo, 2015.
- [15] S. Ali Khan *et al.*, "Fourier Transform Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Application in Functional Groups and Nanomaterials Characterization," Research Gate, 2018, pp. 317–321.
- [16] R. Kusumastuti *et al.*, "Effect Of Dukem Inhibitor On AISI 1010 In The Secondary Cooling System Of RSG GAS," *J. Tek. Reaktor. Nukl.*, vol. 20, p. 102, Jun. 2018.
- [17] M. Ehsanjoo *et al.*, "Long-term corrosion resistance of zinc-rich paint using functionalised multi-layer graphene-tripolyphosphate: in situ creation of zinc phosphate as corrosion inhibitor," 2019.
- [18] K. Shahzad *et al.*, "Electrochemical and thermodynamic study on the corrosion performance of API X120 steel in 3.5% NaCl solution," 2020.
- [19] C. Yang Li *et al.*, "In vitro corrosion resistance of a Ta₂O₅ nanofilm on MAO coated magnesium alloy AZ31 by atomic layer deposition," *Bioactive Materials*, p. 38, 2020. doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.12.001.
- [20] F. Zhang *et al.*, "Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review," *Corrosion Science*, vol. 144, p. 75, 2018.